

加工組立品におけるリサイクル関連技術

中澤 克紀*・大橋 隆弘**・早乙女 康典***

Technology for Recycling Machined and Assembled Products

Yoshinori NAKAZAWA*, Takahiro OHASHI** and Yasunori SAOTOME***

Synopsis: This paper gives an overview of researches on recycling technology of machined and assembled durable products. The problem, which is often recognized as one of the most important global environmental problems, is the disposal of products at the end of life. To contribute to the resolution of global environmental disruption problems, the financial and environmental researches of disassembly and recycling at the end of a product's life have been done. Among them, major attention is paid to disassembly in this paper.

The disassembly process is important to many recycling strategies for reasons of disassembly of components for re-manufacturing and reuse, disassembly for accumulating materials in several fractions for reutilization, and disassembly in order to separate hazardous materials. Optimization of the disassembly sequence is important in order to maximize any financial benefits and to minimize environmental impacts. A result of the survey is that further development of disassembly of existing products is needed and that the knowledge obtained should be applied to design of future products.

Keywords: assembled product, environment, disassembly, reuse, recycle

1. はじめに

1988年6月に開催されたトロントサミットにおいて、成層圏オゾン層の保護、温室効果問題等地球環境問題に積極的に取り組むことが表明された前後から、閣僚レベルの会議を含め各種関連国際会議が開催され地球環境保全に向けた努力が本格的に始まった。人間の利便性を追求した生産活動、消費活動から発生する有害・有毒物質の廃棄および工業製品の大量廃棄が地球本来の環境浄化能力の範囲を超えた結果である。この問題が認識されてから、有害・有毒物質を使用しない、或いは外部に出さないよう留意するとともに、廃棄物を減らすことに専念する必要が生じているが、環境問題は複雑・多様化しその決定的な対策を見出せないものも多く、人間の欲望を抑制せざるを得ない状態になっている。

一方、社会の持続的発展を願い、そのための研究開発が継続的に行われている。本資料は多様な環境問題の内、廃棄された工業製品から材料、部品のリサイクルによる廃棄物の低減に関する研究開発の現状を把握することを目的に文献調査を行ったものである。

2. 歴史的経緯

従来から生産工場においては、省資源、省エネルギーを図った活動が行われ、使用の段階においても燃費の良い車、消費電力の少ない家電製品等が開発されてきたが、廃棄時に生じる問題は考慮の対象外であった。しかし、石油ショックの前後に、山家^{1),2)}により、資源・エネルギーの節約、廃棄物公害の防止を目的とした「還元工場」論が提唱された。これは公害量の減少だけでなく、有害物の追跡回収を可能にすること、生産技術への情報のフィードバックにより生産技術そのものの改善・改良を可能にするとともにコンカレント的思考による種々のメリットを享受できること、さらに還元技術という新分野が開かれること等のメリットを強調している。さらに林³⁾は、同じ頃日本人の発想パターンがリサイクル的であることに注目し、リサイクルを前提にした工業プロセス、製品開発の必要性等を主張している。

その後1989年に環境に調和した生産および還元技術システムの「エコファクトリー」^{4),5)}が提案され、省エネ

* 工学部機械工学科 教授 工博

Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Dr. of Engineering.

** 群馬大学工学部機械システム工学科 助手 工博

Research Associate, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University, Dr. of Engineering.

*** 群馬大学工学部機械システム工学科 助教授 工博

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University, Dr. of Engineering.

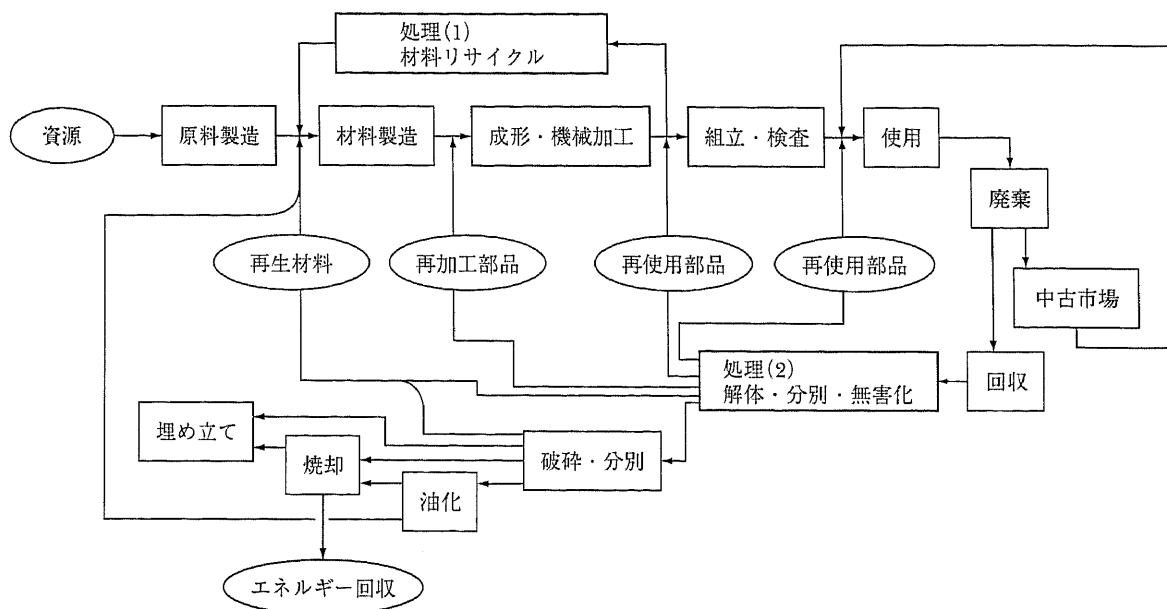


図1 部品、材料のリサイクル

ルギー・省資源、有害・有毒物質の使用制限下での「ものづくり」とリサイクルを目的として、(社)日本機械工業連合会において材料循環型次世代生産システム（エコファクトリー）の開発に関する調査研究が1991、1992年の2年間行われた^{6),7)}。さらに通産省において1993年から2年間先導研究が行われた^{8),9)}。現在は、リサイクルを意識した生産システム（インパース・マニファクチャリング）の研究開発が通産省の補助金の下で1996年から継続されて行われている^{10)~12)}。最近精密工学会誌、日本機械学会誌がそれぞれ同じ視点異なるが特集号を出版した^{13),14)}。

一方、国外においても持続的発展を可能にする工業製品（sustainable industrial products）に関わる研究が必要になるとの認識で、1992年に開催されたCIRPの総会でライフサイクルワーキンググループの設立が決められ、その場で研究成果が発表され、共同研究が企画されることになった¹⁵⁾。そこでは製品が最少（無）環境負荷、人が作業により健康を損なうこと無く、最少資源（材料、エネルギー）の使用により、設計、加工、流通、使用、廃棄されることが持続発展可能な工業と定義付けている。この種の定義は、環境調和型生産では通常言われているものである。1972年に設立された国連環境計画（UNEP）の中に持続的発展を可能にする製品開発ワーキンググループ（WG/SPD: Working Group on Sustainable Product Development）が組織され（1994年）、この種の製品開発に関する活動が行われている¹⁶⁾。前述の林の著書にも記述されているように、自然界においては全ての物が効率よく再利用されているとの視点から産業と

環境との相互作用を考察した入門書が1995年に出版された¹⁷⁾。同書では主に製造業に限定して解説している。また、国際連合大学により、製造工程の再設計、再生可能な原材料の優先的活用、異業種交流等を通じて廃棄物ゼロを目指すプロジェクトが提案された¹⁸⁾。

3. リサイクルの現状

リサイクルは新製品に使えるように廃品から材料或いは部品を回収し、再利用することであり、これはライフサイクルの異なった段階で物質の流れのループを閉じることを意味している。材料・製品の製造から廃棄、リサイクルまでのループを描いたものが図1である。処理(1)は成形・加工工程で生じる廃棄物（国連大学の提唱するゼロエミッションの視点に立つと、この種の廃棄物を部品等を加工したときに生じる副産物と見なし、新しい原料になり得るもの）を処理するためのもので、この工程に入ってくるものは比較的きれいな素性の分かったものである。例えば、プレス抜きカス、射出成形のランナ、スプル等を対象にしており回収・分別が容易である。これらの廃棄物は、熔融過程を含む鋳造においては勿論のこと射出成形でも自工場内で再利用されることもある。しかし、一般的には回収されて廃棄されるか、材料としてリサイクルされる。材料製造工程に還元する場合には、処理(1)を終えたものは純度が高く付加価値の高いものが理想であり、そのための研究も行われている。例えば、自動車用亜鉛メッキ鋼板のプレススクラップから亜鉛と鉄を分離回収し、高品位材料再生技術の確立を目指した研究がある¹⁹⁾。しかし、必ずしも純度の高いも

のが技術的、経済的に得られるとは限らなく、その場合には許容される範囲内でリサイクル材をバージン材に混合して使うことになる。リサイクルが難しいとされていた異種樹脂複合部材のリサイクルの研究も行われている²⁰⁾。

また、群馬エコインダストリアルパーク構想が提案され、群馬県太田地区の工場から排出される廃棄物の高効率再生、廃棄費用の削減等を目指した研究開発が、同地区内において1996年から行われている²¹⁾。太田地区は加工組立型産業に特化した中小企業の多い地区であるが、国際連合大学の提唱する廃棄物ゼロを一中小企業で達成することは難しく、同地域内の異業種間の連携により達成することを目指している。異業種間の連携により資源とエネルギーの有効利用を図り、産業活動の効率化と地域経済の発展を達成し、地球環境に調和したエネルギーの利用と物質循環の社会システムを同地域内に形成しようとする試みである。

製品の寿命がきたときに、製品を修理する費用と代替する費用、機能等を比較検討するが、高い修理費のために多くの製品は現在修理されず廃棄される。処理(2)は一般消費者に行きわたった製品の回収後、及び使用中に機能を果たさなくなり交換された部品等の回収後に位置付けられる。製品の寿命と個別部品の寿命は異なり、製品が全体として役に立たないときでもその部品のいくつかはまだ使用でき、その価値を利用するために製品を分解し部品を回収する。さらに不適合材料の混入により全体として材料リサイクルできない製品、或いはサブアセンブリをリサイクル可能にするために、不適合材料を分離するための分解もあり得る。さらに重要なことは処理(2)において有害・有毒物質の抽出、分離、回収、無害化処理を行うことである。

いずれにしても多くの場合廃棄された製品を分解することから処理(2)は始まる。1970年代という比較的早い時期から山家も定性的であるが指摘しているように、リサイクルのために最後の部品まで加工組立品を分解することは得策ではなく、利潤が最大になるところで分解を中止するのが経済的である。しかし、可能な分解経路は部品数が多くなればなるほど級数的に増加する傾向があるため、実用的に利益が最大になる最適或いは準最適な分解経路を見いだすことが重要な研究課題となっている。製品の分解後は部品として再使用するか、元の形状を壊し材料として有効利用するか(マテリアルリサイクル)、焼却により熱エネルギーとして回収するか、さらに埋立られるかのいずれかである。部品として或いはサブアセンブリとして再使用する場合には、市場に出回っている製品の交換部品等としてそのまま使われる場合(re-use)と、多少の調整等の処置が為されて同じ部品等或いは異なったものに使用される(re-manufacturing)。しかし、理想としては新製品の部品等として使用すること

である。K. Ishii ら²²⁾は製品の特性により設計時に再使用、再加工する部品の割合を増やすものと、材料リサイクルを増やすものに分かれることを指摘している。高価値で、商品寿命が短く、技術サイクルの短い複写機、プリンターを前者の例に挙げ、長期間使われ、技術サイクルが長い掃除機や洗濯機を後者の例に挙げている。また、Xeroxの新複写機では全てのプラスチック部品は取り外され、再使用できるとの記述もある²³⁾。

マテリアルリサイクルにおいても種々のレベルのリサイクルが行われ、製品に使われていたものと同一の品位の材料へのリサイクル、低級な品位の材料へのカスケード利用、さらにはポリマーをモノマーに戻すケミカルリサイクル²⁴⁾もある。最後に材料としての再利用は不可能であるが、前述したように廃棄物を焼却し熱エネルギーとして利用するサーマルリサイクルがある。

環境的に許容されるリサイクルの重要性は認識されているが、その成否は経済性にかかっている。一般にリサイクル処理工程が経済的に成り立つためには、(これらの工程で産出される材料や部品の価格+廃棄物を引き取るときに受け取る処理費)が(回収に必要な輸送費+処理費(設備投資+人件費+電力費等)+処理後の残余物の埋立、焼却費)を上回ることが必要である。その際に処理する量がある程度以上回収できなければならない。地理的に近く、製品の廃棄時に製造業者の引き取りの法制化が進められているドイツ、オランダ、スウェーデンにおける茶および白物製品が廃棄時にどのように回収され処理されているかを紹介している記事²⁵⁾の中にも規模のメリットに触れている。人口、人口密度の低いスウェーデンでは規模のメリットが成り立たなく、使用されているシュレッターにも制限があり、家電製品用のシュレッターでなく自動車用のシュレッターを使用しており、他の二国とは事情が異なる。人口が多く、人口密度の高い我が国においてリサイクル法が施行されれば、回収量そのものに関しては心配が無いと想像されるが、現状では回収数量、価格とも景気の変動を受け、回収が行われないこともある。回収が予想通り行えたとしても、リサイクルのための処理を行った後の用途、市場を見出すことが困難な場合がある。処理後の材料、部品の用途が確保されなければリサイクルは行き詰ることになり、リサイクル材料の用途開発に関連した技術開発も行われつつある²⁶⁾。

リサイクルを環境調和的、経済的に行うためには製品の分解を行うことが必須である。現在廃棄される多くの製品は容易に分解できるように設計されているものは少ない。製品の使用時における保守・検査等のメンテナンスのしやすさを確保するために分解に関心を集めていたが、さらに廃棄時における部品の再利用、材料としての再生を経済的に効率良く行うためにも分解が重要視されている。製品の分解のみが材料の完全なリサイクルを可

能にし、また部品としての再利用も可能になるので、次項で分解技術について述べる。

4. 分解技術

一般に分解は組み立ての逆の行動のように思われるが、リサイクルのための分解は異なっている。前述したように、必ずしも最後の部品まで分解する必要がないし、必要に応じてサブアセンブリのまま回収することもある。G. Boothroyd ら²⁷⁾は過去15年間に開発された易組立設計 (Design for Assembly, DFA) について調べ報告している。DFA は製品の組立を容易にするもので、概念設計の段階で DFA を行うと製品の単純化、組み立て・加工コストの低減、間接費の低減、品質向上、市場に出すまでの時間短縮等の効果が得られる。1975年頃から DFA が考えられており、各企業、研究機関等で数多くの DFA が提案され、実際に使用されて成果をあげていることが報告されている。同文献には我が国の家電メーカー各社の組立性評価法、製造性評価法が紹介されている。

易分解設計 (Design for Disassembly, DFD) に関する研究も紹介されているが、環境保護、資源の有効利用の視点から工業製品の廃棄が問題視されはじめた頃であるから、まだ研究が緒についたばかりであり詳細な説明は少ない。その後 F. Jovane ら²⁸⁾によって分解に関する研究の概説が為された。既存の製品が分解の容易性を考慮して設計されていないことが大きな問題であるとしている。現在環境保護、法規制により製品の製造、流通、使用、廃棄を経済的に行うよう設計に変化が求められており、ライフサイクル設計が必要で全ての段階を同時並行的に考慮しなければならない。分解のルールを考慮した設計の定式化に対しては数多くの企業、研究機関で取り組まれており、それらの活動状況が製品設計、プロセス設計、システム設計に分けて報告されている。前述の G. Boothroyd ら、F. Jovane らの CIRP における keynote paper は、1992年頃までの多くの文献を引用しており概説として参考になる。

分解技術に関する研究は大別すると、ハードウェアに関するものとソフトウェアに関するものになる。前者は柔軟な分解用のロボット、分解工具、革新的な分解技術等の研究が相当する。例えば、J. Tuominen ら²⁹⁾は、廃車の分解とリサイクルを行うための分解セルとして、NEUROBOT と名づけたニューラルネット複数センサロボットシステムによるプロトタイプシステムの構築を試みているが、完全にハードウェアに限定される研究ではない。この他にも、製品分解のために6つの構成要素 (オペレーター、ロボット、コンピュータ意思決定システム、センサ、特殊工具、製品データベース) から成る半自動の柔軟な分解セルが Karlsruhe 大学で開発中であり、そのデータベースシステムが紹介されている³⁰⁾。こ

れらの研究においてハードウェアとソフトウェアの研究が明確に区分される訳ではない。ハードウェアそのものに関する文献は比較的少なく、今回の本資料では言及しない。

ソフトウェアに関する研究は、分解 (組立) 可能性の判定、或いは分解 (組立) 操作の創成の方法に力点を置いたものと、有限探索で分解工程を最適化することに力点を置いたものとに分けられる。前者は自動設計に関わるような伝統的な構造モデリング方法やそこから分解工程を自動的に生成する手法についての研究である。後者は経済的、環境的、或いはそれ以外の何らかの目的関数を最適化する分解工程を得る手法の研究である。これらの間も完全に分離できるものばかりではない。前者に関連する論文は多く発表されているが、ここでは分解と環境をキーワードにしている文献を挙げるにとどめる。

最初に主として分解シーケンスを探索するものを紹介する。

T. C. Kuo ら³¹⁾は部品固定グラフ (Component Fastener Graph) を用いて部品の組み付け関係を表現し、そこから分解シーケンスを生成するアルゴリズムを開発した。グラフの頂点はコンポーネント、稜線は部品間の接続関係 (複数の接続をまとめることも可) を表している。コンポーネント数 n の部品固定グラフ $[F]$ は、 F_{ij} (ただし、 i と j が k 個の締結 (ねじ、リベット、インサート一つ一つを1とする) がある場合を k 、無い場合を0とする) を要素とする $n \times n$ の部品固定マトリックスで表せられる。グラフを分断するコンポーネントに着目することで、アセンブリをサブアセンブリに分割することを試みている。また、分解可能性マトリックス $[DP]$ は、その分解方向に対して、特定の部品 j を分解するには部品 i が分解されていなければならないといった場合に $DP_{ij}=1$ となるもので、そのマトリックスを $+x, -x, +y, -y, +z, -z$ それぞれの方向に定義し、分解工程の導出を行っている。パソコンの分解を例示している。

H. Srinivasan ら^{32), 33)}は、特定の部品群を製品から分離するシーケンスを探索する問題を対象としたアルゴリズムについて述べている。分解問題は、完全分解問題 (Complete Disassembly, CD) と選択性分解問題 (Selective Disassembly, SD) に分けられるものとし、さらに SD 中でも、一つの部品のみを対象とする 1-SD でなく、複数の部品を対象とする S-SD で、なおかつ Wave Propagation 手法を用いて工程の最適化が図られた。組立状態の表現は、部品間の接続性 (Accessibility) AC_i^j と各部品の易分解性 (Disassemblability) Δ_i を定義して行っている。Accessibility AC_i^j とは部品 i が移動できる (部品 j からみた相対的な) 方向である (移動できない場合は0)。Disassemblability Δ_i は現在の状態で部品が分解できるかどうかを表す TRUE か FALSE の値をと

る。

次に、廃棄物の処理において経済性、環境調和性両者を評価でき、分解の手順、分解度を定めるための研究が為されているのでそれらを紹介する。これらの研究には分解シーケンスの探索も含まれている。

Navin-Chandra³⁴⁾は環境調和型設計 (Green Engineering Design) の概念と環境指標 (Green Indicator)、それらを用いた設計ツール ReStar について述べている。環境調和型設計は「設計結果に対する環境調和性の判定」と「設計中の環境指標を考慮した意思決定」によって構成されるとしている。環境調和性の評価は、LCA に基づいて行われる。

システム ReStar は入力された設計 (または製品) に対して、作り出される環境負荷より回避した環境負荷が大きいような最適な廃棄・リサイクル計画を導出するとしている。ReStar は幾何学的情報をベースとして 1 万種類の分解手順を自動生成し、最適化する能力を持つ。また、設計変更に関して感度解析を行うことができる。ReStar は分解工程を決定する毎に、分解作業を継続すべきかどうか、分解された部品を販売、補修、破壊、廃棄するかを決定する。また、廃棄による経済的損失・環境汚染をリカバリして (Design for Recovery) 最小に抑えるよう製品設計時に意思決定することを支援する。また、分解工程は、幾何学的制約条件から幾何学的に推論される。また、工程最適化については拡張された巡回セールスマン問題として処理している。

他にも解体の手順を巡回セールスマン問題の変形とみなし、Hopfield network を用いたニューラルネットワーク法で分解手順を求めている例がある³⁵⁾。分解における最適な解を探索するために、解空間の全域を探すには非常に時間がかかるので、短時間で近似解を求めるために本法を用いているが、優先順位の拘束のある問題を解くために、さらに付加的な項をエネルギー関数に追加している。体重計を例にとり、最適に近い分解順序を示している。収束速度は十分満足するものではなく、パラメータの値や初期値、エネルギー関数の選択等を検討することで改善が可能としている。

W. A. Knight ら^{36), 37)}は分解時の経済的、環境負荷的に最適な分解シーケンスの決定手法と、小物部品としてコーヒーメーカーと多少大きい家電製品、自動洗濯機、冷蔵庫、カラー TV に適用した結果について述べている。これは 1994 年に Knight らが提案した DFMA (Design for Manufacture and Assembly) のコンセプトに基づいている。Girard (1995) らによって提案された経済線 (financial line) と環境線 (environmental line) を用いて手法の解説を行っている。易組立設計 (DFA) の製品設計に対する実施を前提条件としている。DFA による解析によって予め製品の組立てサブシーケンス群が得られているはずであるが、このサブシーケンス群の逆順

が製品分解シーケンスの基となる。ユーザはこのサブシーケンス群のリストを編集して、経済的見返りと環境への負荷を考慮して廃棄時に取り出したい部品 (を含むサブシーケンス) のグループをつくる。分解コストは作業時間に依存した値とし、環境への負荷の評価としては TNO (オランダ応用科学研究機関) Product Center で開発された一つの指示数 MET (Material, Energy, Toxicity) ポイント (Klaisvaart ら 1994, 1995) を用いた。この MET ポイントは完全な LCA から求められたものではないが、設計者が理解しやすいようにした或る種の LCA で計算されたものである。これらのリストを Microsoft Excel の表とする。分解手順の最適化は、最も高い評価値を持つ部品 (を含むサブシーケンス) から分解を行うようにサブシーケンス群を並べ替えることで行われる。MET ポイントの評価値は全体を一括して一般廃棄する環境負荷が最悪値であり、分解により個々の部品を、再利用や環境負荷が少ない特殊廃棄により処理可能にすることによって、その分を減じていけるとしている。ある程度分解すると、まとめて一般廃棄しても、分離して廃棄しても環境負荷が変わらない部品ばかりが残るようになるので、MET ポイントの減少は分解が進行するにつれ収束していくとしている。図 2 はコーヒーメーカーを分解したときの経済線図を表し、組立の逆に分解したときと最適化を図った場合の利益 (損失) を分解時間とともに示している。図 3 は同じ対象を再設計した場合の経済線図と環境線図を示している。

コーヒーメーカーのような小物製品では、分解、廃棄の費用は再利用、再生で得る利益を上回るが、大きな家電製品では分解リサイクルで利益が出る。TV や自動洗濯機では利益最大の時点で分解を中断すると、環境への影響が改善される割合が少なく、最少の環境インパクトと最大の利益の間には妥協が必要である。

受話器の分解が例示されている³⁸⁾。どこまで分解するか、経済性に関しては製品の引き取りコスト、その点までの分解コスト・分解により得られる累積価値 (部品等のリサイクル、再利用により)、未分解の部分の廃棄コストを検討することにより決め、環境に関しては前述の MET ポイントを用いている。受話器のような小物の場合には分解せずにシュレッダーにかけ破碎してその後材料を分別し、残部を埋め立てるか、焼却することが最も効果的であると結論付けている。

なお、G. Boothroyd と P. Dewurst が 1981 年に設立した Boothroyd Dewurst, Inc. (BDI) から生産性設計支援のためのソフトウェアツール DFMATM が販売されている。本ツールは Design For Assembly, Design For Manufacture, Design For Service, Design For Environment から構成されている。分解性の評価は BDI が開発した手法を、環境への影響評価は TNO が行った MET ポイントを用いている。

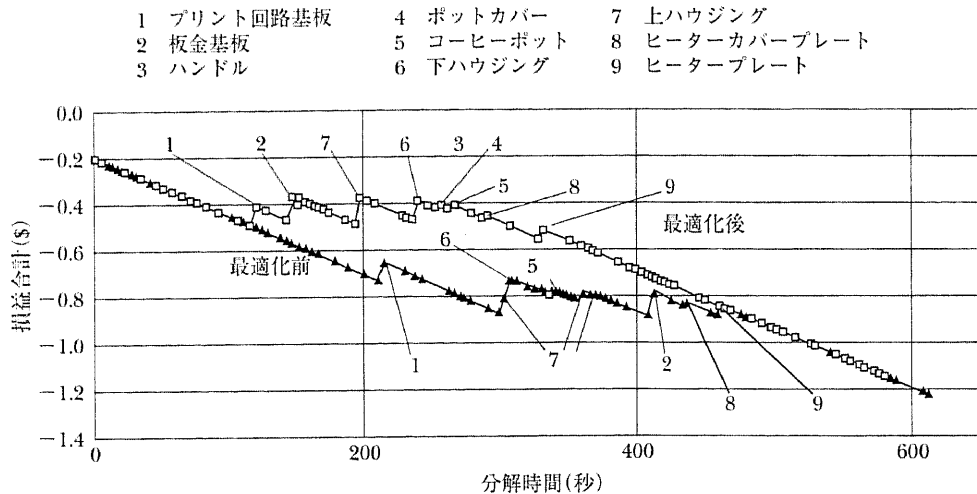


図2 コーヒーメーカーの分解時の経済線図

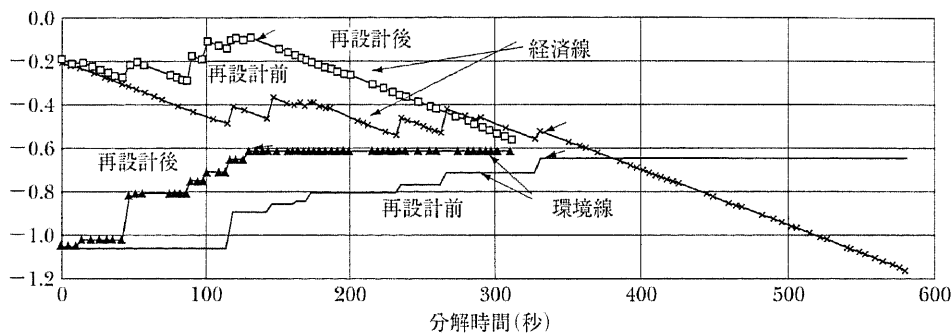


図3 コーヒーメーカーの再設計による経済線図と環境線図

設計者が自分の設計を評価し改善することを支援するためのもので、製品のリサイクル性の定量的評価を定式化した論文がある³⁹⁾。特徴は、①廃棄時の全ての選択肢とその組み合わせを考慮している、②多様なリサイクルの目的、経済、技術、環境の面を重視している、③これらの目的を満たすときに生じる定量的なトレードオフを包含している、④将来のリサイクル状態に関する不確実な情報を扱えることである。将来の原料価格の変動、プロセス技術の進歩、廃棄の費用の変動、法規制を考慮に入れた解析が出来る。最適な分解の戦略は、個々の部品の価値と分解の作業により決められることと、分解度が1枚のグラフで表示できること等からAND/OR Graphを採用している。さらにこのグラフをそれぞれの部品或いはサブアセンブリに対して廃棄時の選択肢を加えたRecovery Graphに変換し各部品の異なった処理に対応してリサイクルの方法が選択できる。全ての部品の価値と分解作業を評価する3個の部品から成る場合のAND/OR GraphとRecovery Graphを示す(図4)。本手法を13個の部品からなる洗濯機のサブアセンブリに

適用した。将来に関しては3種類のシナリオの基で計算している。リサイクリングに関する経済的、技術的進歩に対し、異なったシナリオに基づいて計算した結果、製品の評価や、設計変更に影響を及ぼす廃棄時の戦略が異なることになった。

K. Ishiiら^{22),40)}は、設計者がリサイクルを考慮した設計を進めるために、製品の廃棄時の分解プロセスを表示する分解プロセス図(reverse fishbone diagram)(図5)を提案している。同図は組み立てプロセスを記述するときに使われている組立プロセス図(assembly fishbone diagram)に源を置いている。同図における樹の大きさと形状は分解プロセスに関連する複雑さとコストを示している。同図が製品系列(product family)、多世代の製品(product generations)に対して作成され、製品系列、多世代に亘る製品に共通の廃棄或いは分解装置が適用できるかどうか判断するために比較される。さらに、リサイクルの視点から製品設計におけるモジュール性及び材料選択を評価する方法を述べ、リサイクル率を高めるために材料を選択する際の助けとなる設計チャートリサイク

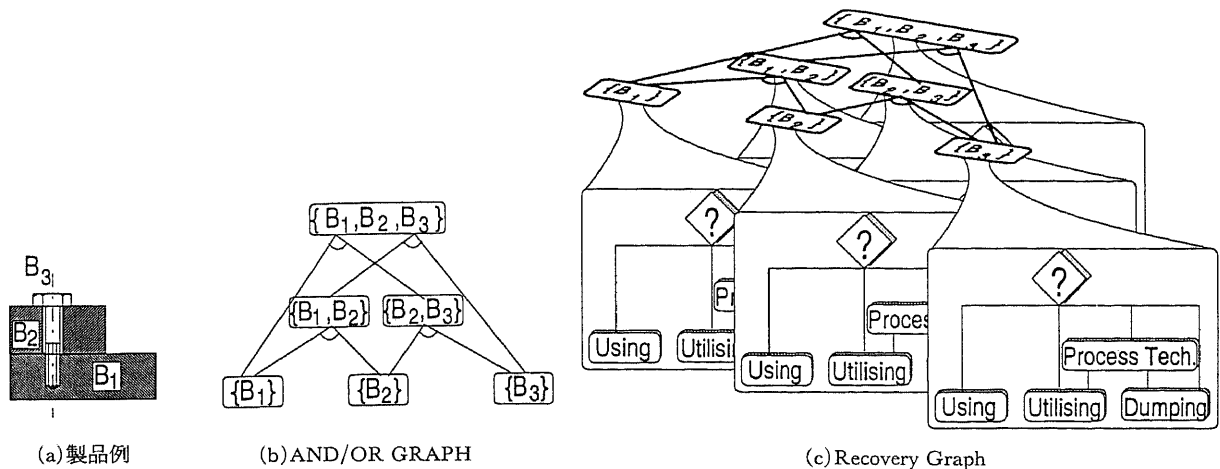


図4 三部品からなる製品を例とした Graph

ル性評価マップ (recyclability map) を提案している。同マップは分解・分離の複雑さと材料のスクラップ率を結びつけるもので、設計者が適切な材料選択・モジュール化によりリサイクル性を改善することを支援するものである (図6)。分解プロセス図は製品の論理的な分解方法を示すための有効なツールであるが、廃棄後の戦略を決定することを支援していない。廃棄後の戦略を特定した後、設計者は同図を使うことが出来る。そこで、製品の特性に基づいた戦略を予測するためのツールを K. Ishii らは現在開発中である。廃棄時の戦略を決めた後、詳細設計段階においてリサイクル性評価マップや分解プロセス図のようなリサイクル設計ツールを実行する。

M. H. Wang ら^{41), 42)}は、計算機による解析を可能にするための情報を、組織的体系化するための言語 (Disassembly Modeling Language (DML)) を開発し、さらに DML でコード化された製品を分解するための解析ソフトウェアツール (Disassembly Model Analyzer (DMA)) を開発した。DML は分解モデルに必要な情報を全て明確に表現できる言語であり、計算機のプログラミングによって容易に読めるものである。製品を分解するにあたって重要な情報は2種類であり、最初は製品を記述する物理情報で部品の質量・材料、部品の構造、分解の拘束条件、部品の除去に要する時間のようなもので、もう一つは市場環境を記述する経済情報、労賃、再使用・再加工される部品の売却価格、種々の材料のリサイクルに必要な或いは埋め立てに必要なコスト等である。解析は製品の構造の解析から分解計画の最適化まで行うことが出来る。前述の言語と解析ツールを自動車のリサイクル問題に適用した。Highland Park にある Vehicle Recycling Development Center で実際に自動車を解体し部品の構造情報と拘束条件等を調べ、これらの数値を用いて前記の DMA で最大の利益をあげるための解体

計画を実行したときのリサイクル、シュレッター後のリサイクル及び埋め立ての割合等を求めている。

製品の分解プロセスと再利用/リサイクルプロセスである Design for De-manufacturing (DFDM) は Design for Disassembly, Design for Environment を含むものであり、DFD の多くは与えられた組立品に対して分解の手順を求めるアルゴリズムについて記述しているが、製品内の個々の部品の分解の方向を決める問題を扱っているものは極く僅かであるとし、N. Shyamsunder ら⁴³⁾は、環境を考慮した製品の設計を支援するために、de-manufacturing の支配的因子と設計/分解に必要な事項を全て考慮する方法論を提案している (図7)。本法はインプットデータベースから入手できる材料、環境、適用領域因子を考慮することによる知識ベース (ルール/経験) の設計を含んでいる。この知識ベースが de-manufacturing processor をガイドし、比較のための基準を定式化し、分解手順を最適化する。設計の比較の基準は知識ベースによって作り出される対象の変数 (コスト、時間、スペース、アクセスのしやすさ、スクラップの量等を含む) 及びそれらの相対的重要性から動的に計算中に作り出される。この基準が分解順序を最適化する際に de-manufacturing processor を助ける。de-manufacturing processor は CAD モデルに対し de-manufacturing を解析し、必要なら設計者に変更を薦める。本論文は仮想的 de-manufacturing と仮想的 disassembly に対する方法論を示しており、具体例として10個の部品からなる簡単な軸支持台の分解を示している。

ソフトウェア PDM IV (Product Design Merit) は7つのパラメータを用いて組立品の各部品を解析し、ライフサイクルにわたる性能、組立性、保守性、リサイクル性の容易さを定量的に明らかにできる⁴⁴⁾。組立性評価に関する3つのパラメータは供給、挿入、締結であり著者ら

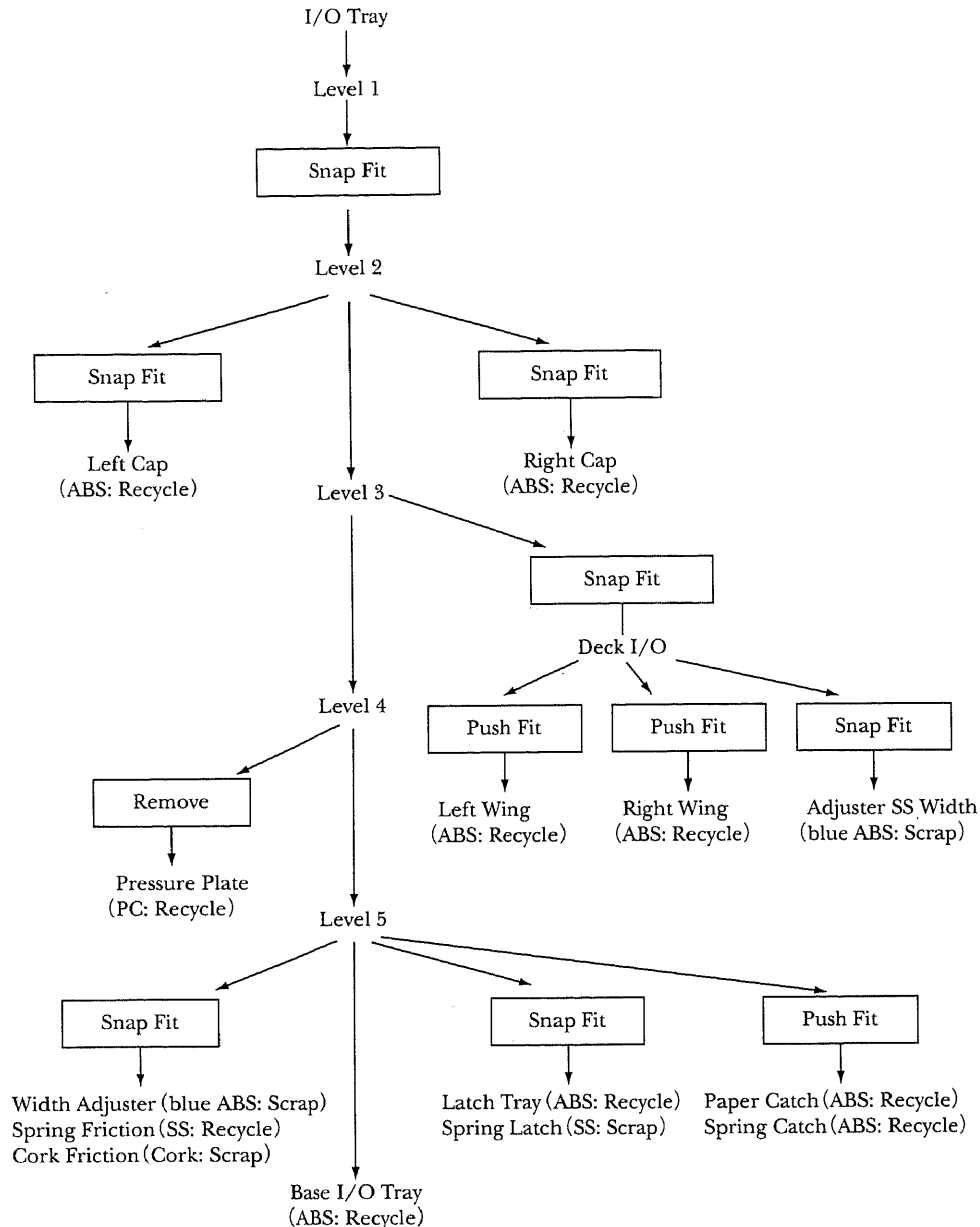


図5 分解プロセス図 (ペーパーパートレイ)

の大学 (North Carolina State University) で開発した組立性の評価のための Product Design Merit, Design for Assembly ツールに、保守性、リサイクル性の評価を追加した。保守性評価に関する3つのパラメータは、分解作業パラメータ (部品を分解するのに必要な方法に点数をつける)、分解工具パラメータ、修理作業パラメータ (組み立て品から部品を取り除くのに必要な作業の数) であり、これらの評価によって保守性が点数付けされる。リサイクル性はまず分解でき、次にリサイクル可能なユニットに分離することを含んでおり、リサイクル性においては分解作業パラメータ、分解工具パラメータ以外に材

料選択パラメータが使われる。それぞれのパラメータの値は論文中表示されており、組立性、保守性、リサイクル性の評価点の平均値、ライフサイクル効率 (Life-Cycle-Efficiency) の評価点により設計の良悪が判断されることになっている。自動車の内装パネルを例にして、PDM IV の成果を示している。この方法による再設計は、元の設計を大きく改善した。

I. Zeid ら⁴⁵⁾は分解問題が易分解設計 (DFD) と分解工程計画 (Planning for Disassembly, PFD) の2種に分類できるとし、後者の PFD を対象として、製品を分解するのに有効な手順を決めるための類似問題解決法

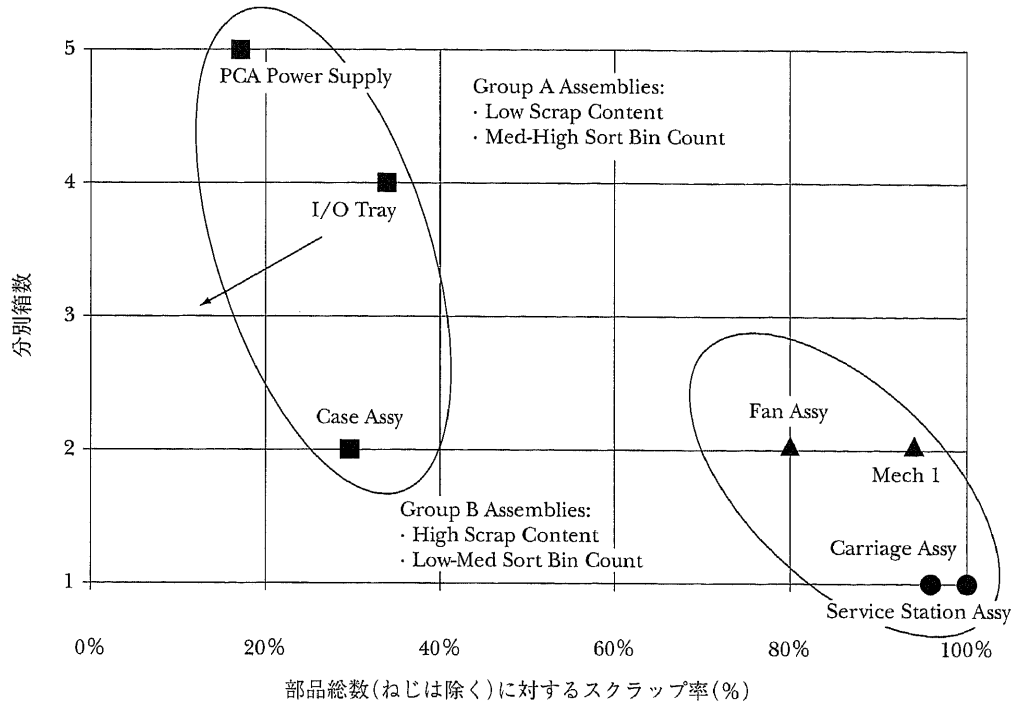


図6 リサイクル性評価マップ

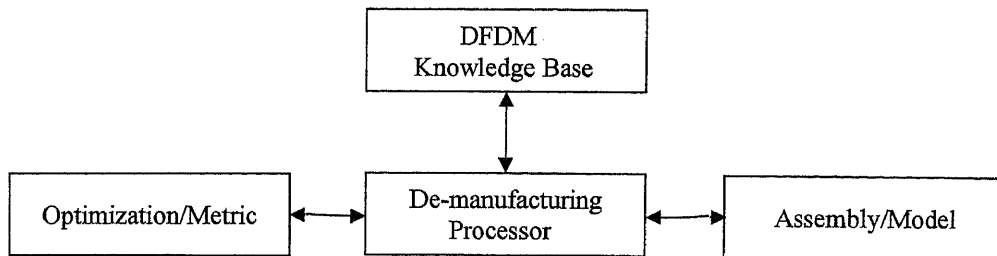


図7 DFDMの方法論

(Analogical Problem Solving, APS) を用いたシステムを構築した。APSは直感的判断をサポートすることに基礎を置き、似た問題解決の再現をユーザーに対して提示する。本研究は学習的 PFD を指向している。APSは過去の問題に対する解決が現在の問題に対する解決になるということを前提としており、関連する目標の問題を解くものである。エキスパートシステムに比べ、過去の解決を用いるだけで、再推論等は行わない。

D. Spath ら⁴⁶⁾は LCA を用いて分解工程設計・リサイクルプロセスの設計を支援するシステムを開発した。製品のライフステージ毎の Environmental Driver と呼ぶ環境への影響をたどる Karlsruhe 大学で開発された Eco-Portfolio 法を用いて設計の環境に対する評価を行う。設計アセスメントに際して用いる指標は Design Force (分解やリサイクル適合性に直接影響を及ぼす、これから開発される製品の設計によって決まる製品の特徴・パラメ

ータ) と Ecological Force (これから開発される製品のライフサイクルの中で間接的に及ぼす影響) の2つを用い、実際に湯沸機に適用した結果を示した。

W. G. Hoenderdaal⁴⁷⁾は電気製品のリサイクルを目的として ERIS (Electronics Recycling Information System) を開発した。ERISは製造者とリサイクル担当者間の情報交換システムであり、リサイクル担当者から製造者へ設計改良のための情報をフィードバックし、リサイクルプロセスの経済的評価や最適化を行うツールである。ERISはポーランド社のオブジェクト指向データベース記述言語 Paradox for Windows を用いて開発された。分解プランの自動生成や、可能なリサイクル方法の案内などを、テキスト、写真、図などの様々な様式の情報形態を用いて行うことが出来る。

H. S. Mok ら⁴⁸⁾は分解容易性についての考察を主体とし、分解プロセスをより詳細な要素に分解することで、

分解プロセスの性質を解析している。分解プロセスを、予備プロセス(pre-process)、実行プロセス(in-process)、後プロセス(after-process)に分けた。予備プロセスは、対象物体固定、分解ポイント発見であり、実行プロセスは、分解ポイントへの接近、脱着、部品のハンドリングである。後プロセスは清掃、部品の破壊のようなプロセスである。さらに Mok らは分解容易性の要因群と対象機械システム(部品)の持つパラメータ群を調査し、対象機械システム(部品)の持つパラメータの分解容易性の各要因への影響度合いを定めた。分解容易性の定量的評価により対話的に弱点に関する質問がシステムからなされ、ユーザがそれに答える形で設計を改良する。実例として車の計器パネルの射出成形部品の改良例が示されている。

W. Li ら^{49),50)}は「包括的な経済モデルを最適分解シーケンス生成法と共に開発する」ことを目指した。Li らは組み立て状態の表現として Liu (1992) のモデルを利用した。このモデルは部品(part)と組み付け(joint)の2つの要素で構成される。各々の部品の間がどの組み付けで固定されているか定義することで組み立て状態を表現する。同じ方法によって締結されている組み付けは同じ組み付け番号(Joint ID)を持つように定義する。このようにすることでこの組付け一つ一つが分解手順に対応する(すなわち、joint 毎にその joint で間接的、直接的に組付けられる全ての部品のデータを明示的に人間が設定することで、暗黙のうちに分解可能性判定を行っている)。Li のシステムは、組み付け間の順序関係を設定することもできる。分解手順は経済性モデルを定義し、採算が最大になる時点で分解を中断するように行っている。アルゴリズムは以下の経済性の評価式を最大化する分解シーケンスを発見するものである。
$$[(\text{再利用するとしたときの益}) + (\text{廃棄するとすればかかる費用}) \text{の全ての部品の合計}] - [(\text{分解にかかる費用}) \text{の全ての組み付けの合計}] - [\text{全体の廃棄コストのうち、分解しても再利用しない部分の廃棄費用}]$$
上記経済モデルを目標関数とした最適化を行うにあたり、Li らは Ven Laarhoven (1987) らが開発した焼鈍シミュレーション法(simulated annealing algorithm)を用いた。

C. Boswell²³⁾は実際に電気製品の分解を行い DFD の効果を調べるとともに、複数回分解を行い学習効果を調べている。まず従来型の設計を行った場合の最初の分解時間が60分であったが、分解を繰り返していると学習効果が現れ30回目の分解で所要時間は14分になった。DFDを採用した結果、最初の分解時間が20分になり、学習効果が現れると8分で完了することが判明した。30個の製品を分解するのに要する時間は DFD を用いると約半分になった。分解時間を短縮すること以外に分解の費用を相殺するものは、分解された素材の価値である。

例えば IC メモリーデバイスは現在の貴金属の回収より価値があり、経済的なインセンティブを与えることが出来る。自動分解に関する研究にも多少言及している。

5. おわりに

環境的にも経済的にも許容されるリサイクルが行われるためには、工業製品の分解は避けて通れないものであり、加工組立品の分解を中心に文献調査を行った。今回は海外における実践、研究を紹介した。我が国においても大学、国公立の試験研究機関はもちろんのこと家電、事務器、自動車メーカーにおいて積極的に取り組まれている。次の機会に今回あまり言及しなかった分解(組立)可能性の判定等の研究を含めてまとめることにする。

分解を経済的に行う手法が種々の最適・準最適化手法とともに多数提案され、最近の製品は従来製品と異なり設計時にリサイクル戦略、分解手法が考慮されていることが多いようである。しかし、実際に分解を適切に行うにあたり、分解工程の最適化の評価には各種のデータベースが必要であり、データベースの完備、更新が重要である。

また、分解コストの低減を図るためには締結法の適切な選択が重要であり、種々の締結法の特性に重み付けを行うとともに品質機能展開法(Quality Function Deployment Approach)を適用し締結法の優先順位評価を行っている例もある⁵¹⁾。さらに、材料リサイクルにおいて実際に締結されている部材同士の締結をはずす必要があるかどうかの判断を可能にする材料の適合性の規準を明確にすることも重要である。

リサイクル処理工程に入ってくる個々の廃棄物からの利益を最大(損失を最小)にするとともに環境への負荷を最少にするためには、人間活動の大きなループの中で、このリサイクル処理工程の最適化が図られなければならない。廃棄物処理工程に入ってくるものの多くは家電製品、自動車等不特定多数の斑気のある消費者が使用したものであり、思うものが思うときに(計画的に)入ってくるわけではないし、出る側においては、部品等として新製品に組み込む場合には、新製品の製造ラインの要求に沿う形で供給されなければならない。処理工場が、或る特定企業の製品の廃棄処理を行うのか、不特定企業の廃棄製品を対象にするかで下流側(従来型では上流側)に位置する製造工場に対する位置付けは異なり、それぞれにおいて部品の流れに関連した運用上の問題が生じるので、これらの問題を解決することもリサイクルを順調に行うためには必要である。さらに、中古の部品を新製品に組み込むときの洗浄、検査工程における費用が新品部品より安価でなければならない。材料・部品の循環という大きな視座から俗に言う廃棄物を改めて考え、これらの問題を解決することが肝要である。

引用文献

- 1) J. Yamaga: "Proposal for Renewal Plant as against Production Plant", Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory no. 14 (1974), pp. 1-10.
- 2) 山家譲二: "生産工場と対比される還元工場建設の提唱", 機械技術協会会報 vol. 26-no. 2 (1974) pp. 1-6.
- 3) 林雄二郎: 日本型成熟社会 (1975), 中央経済社.
- 4) 井上英夫: "エコファクトリー技術", 日本機械学会誌, vol. 95-no. 884 (1992), pp. 38-41.
- 5) H. Inoue: "Ecofactory: Ecologically Conscious Technology for the 21st Century", International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing vol. 4-no. 1, pp. 13-28.
- 6) (株)日本機械工業連合会: "材料循環型次世代生産システム(エコファクトリー)の開発に関する調査研究報告書" (1992年3月).
- 7) 同上 (1993年3月).
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (財)エンジニアリング振興協会: "エコファクトリー技術に関する調査研究" (1994年3月).
- 9) 同上 (1995年3月).
- 10) (財)国際ロボット・エフ・エー技術センター: "インバースマニュファクチャリングシステム開発プロジェクト調査研究報告書" (1997年3月).
- 11) (財)製造科学技術センター: "インバースマニュファクチャリングシステム開発プロジェクト調査研究報告書" (1998年3月).
- 12) 同上 (1999年3月).
- 13) 精密工学会誌: 着実に進展する環境調和型生産, vol. 64-no. 4 (1998).
- 14) 日本機械学会誌: 作りやすい設計, 壊しやすい設計, vol. 101-no. 954 (1998).
- 15) L. Alting, J. Jorgensen: "The Life Cycle Concept as a Basis for Sustainable Industrial Production", Annals of CIRP vol. 42-no. 1 (1993), pp. 163-167.
- 16) <http://unep.frw.uva.nl/>
- 17) T. E. Graedel and B. R. Allenby: Industrial Ecology (1995), Prentice Hall.
- 18) 日刊工業新聞: 1995年1月23日
<http://www.ZERI.org/>
- 19) Y. Saotome, Y. Nakazawa, Y. Yokoyama: "Vacuum Aided Recycling Systems Technology as a Restoration Systems Technology of Ecofactory", Vacuum vol. 47-no. 6-8 (1996), pp. 833-836.
- 20) 藤堂安人: "精密・複合部材をリサイクル", NIKKEI MECHANICAL no. 454 (1995), pp. 51-57.
- 21) 早乙女康典, 荻野雄一郎, 青木隆行, 中澤克紀: "ぐんまエコインダストリアルパーク形成に関する研究(1)副産物オンラインデータベースの創成", 日本機械学会'97桐生講演論文集 (1997) pp. 188-189.
<http://www.pref.gunma.jp/d/01/zero/>
- 22) C. M. Rose, K. A. Beiter, K. Ishii and K. Masui: "Characterization of Product End-of-Life Strategies to Enhance Recyclability", Proc. DETC 98, 1998 ASME Design for Manufacturing Symposium. DETC 98/DFM-5742, pp. 1-9.
- 23) C. Boswell: "The Economic Impact of Design for Disassembly on the Electronics Recycling Process", Proc. 4th International Congress on Environmentally Conscious Design and Manufacturing (1996), pp. 397-403.
- 24) 例えば, 長井 寿編著: 高分子材料のリサイクル (1996), 化学工業日報社.
- 25) C. Nagel, J. Nilson and C. Boks: "European End-of-Life Systems for Electrical and Electronic Equipment", Proc. EcoDesign'99: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (1999), pp. 197-202.
- 26) 例えば, (株)軽金属協会, (財)素形材センター: "リサイクル材使用による低コスト精密アルミニウム冷温間鍛造法に関する開発研究報告書" (1997).
- 27) G. Boothroyd and L. Alting: "Design for Assembly and Disassembly", Annals of CIRP vol. 41-no. 2 (1992), pp. 625-636.
- 28) F. Jovane, L. Alting, A. Armillotta, W. Eversheim, K. Feldmann, G. Seliger and N. Roth: "A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly", Annals of CIRP vol. 42-no. 2 (1993), pp. 651-658.
- 29) J. Tuominen, A. Autere, U. Berger and R. Meier: "Autonomous Robot Based Disassembly of Automotive Components", Proc. 11th Conf. Integration in Manufacturing 6 (1995), pp. 341-352.
- 30) D. Chevron, S. Peles, J. Schmidt and U. Suchy: "Dynamic Database Design for Disassembly Processes of Technical Consumer Products", Proc. Conf. Management and Control of Production and Logistics (1998), pp. 561-566.
- 31) T. C. Kuo, S. Y. Yu and H. C. Zhang: "Disassembly Planning Analysis for Electromechanical Products", Proc. Concurrent Product Design and Environmentally Conscious Manufacturing, ASME DE-vol. 94/MED-vol. 5 (1997), pp. 225-241.
- 32) H. Srinivasan and R. Gadh: "A Methodology to Design for Selective Disassembly", TMCE-International Symposium, Tools and Methods for Concurrent Engineering (1998), pp. 321-328.
- 33) H. Srinivasan and R. Gadh: "Complexity Reduction in Geometric Selective Disassembly Using Wave Propagation Abstraction", Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (1998), pp. 1478-1483.
- 34) D. Navin-Chandra: "Design Software for Product Disassembly and Recycling", Proc. Evaluation of the "Green Car" Auto Recycle '93, pp. 129-140.
- 35) H.-H. Huang and M. H. Wang: "Optimal Disassembly Sequence Generation Using Neural Network", Proc. 4th International Congress on Environmentally Conscious Design and Manufacturing (1996), pp. 231-238.
- 36) T. Harjula, B. Rapoza, W. A. Knight and G. Boothroyd: "Design for Disassembly and the Environment", Annals of CIRP vol. 45-no. 1 (1996), pp. 109-114.
- 37) W. A. Knight: "Software Tools to Evaluate Cost Benefits and Environmental Impact of Designing for Disassembly", Recycling and the Environment, Proc. Regional Technical Conference (1996), Design for the 21st Century, pp. 27-38.
- 38) M. Sodhi and W. A. Knight: "Product Design for Disassembly and Bulk Recycling", Annals of CIRP vol. 47-no. 1 (1998), pp. 115-118.
- 39) E. Zussman, A. Kriwet and G. Seliger: "Disassembly-Oriented Methodology to Support Design for Recycling", Annals of CIRP vol. 43-no. 1 (1994), pp. 9-14.
- 40) K. Ishii: "Material Selection Issues in Design for Recyclability", Proc. 2nd International Conference on EcoBalance (1996), pp. 435-440.
- 41) A. Spicer, P. Zamudio-Ramirez and M. H. Wang: "Au-

- tomotive Application of Disassembly Modeling", Proc. 4th International Congress on Environmentally Conscious Design and Manufacturing (1996), pp. 189-196.
- 42) A. Spicer, P. Zamudio-Ramirez and M. H. Wang: "An Overview of the Disassembly Modeling Language and the Disassembly Model Analyzer", Proc. 4th International Congress on Environmentally Conscious Design and Manufacturing (1996), pp. 215-222.
 - 43) N. Shyamsunder, H. Srinivasan and R. Gadh: "Virtual Demanufacturing via Virtual Disassembly to Design Environmentally Conscious Products", International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing vol. 6-no. 1 (1997), pp. 37-50.
 - 44) P. J. Targos and M. K. Ramasubramanian: "Software Implementation of a Design for Life-Cycle Analysis Scheme", International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing vol. 6-no. 3 (1997), pp. 45-53.
 - 45) I. Zeid, S. M. Gupta and T. Bardasz: "An Analogical Problem Solving Approach to Planning for Disassembly", Design for Manufacturing and Assembly, ASME-PUBLICATIONS-DE vol. 89 (1996), pp. 79-89.
 - 46) D. Spath, M. Hartel and C. Trits: "Life Cycle Assessment Tools to Support Environmental Product Design and Economical Disassembly of Technical Consumer Products", Proc. 10th International Conference Engineering Design vol. 3-no. 23 (1995), pp. 1066-1072.
 - 47) W. G. Hoenderdaal: "Economics, Product Design and Future Changes Resulting from Analysis of Disassembly Processes for Consumer Electronics", RECYCLE (1995), Maack Business Services, pp. 12-4.1-12-4.7.
 - 48) H. S. Mok, H. J. Kim, and K. S. Moon: "Disassemblability of Mechanical Parts in Automobile for Recycling", Computers Industrial Engineering vol. 33-no. 3/4 (1997), pp. 621-624.
 - 49) W. Li, C. Zhang, H.-P. B. Wang and S. A. Awoniyi: "Design for Disassembly Analysis for Environmentally Conscious Design", Proc. International Congress Manufacturing Engineering, ASME-PUBLICATIONS-MH, MED-vol. 2-2/MH-vol. 3-2 (1995), pp. 969-976.
 - 50) W. Li, C. Zhang, H.-P. B. Wang and S. A. Awoniyi: "Design for Disassembly: An Effective Means to Minimize the Cost of Recycled Parts", Proc. ISPE Int. Conf. on Concurrent Engineering Research and Applications (1996), pp. 335-342.
 - 51) C. Tung and M. H. Wang: "Faster Selection for Design for Disassembly", Proc. 4th International Congress on Environmentally Conscious Design and Manufacturing (1996), pp. 223-230.